



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**KONSTRUKČNÍ NÁVRH PLANETOVÉ PŘEVODOVKY  
RC MODELU VYRÁBĚNÉHO METODOU 3D TISKU**

DESIGN OF A PLANETARY GEARBOX OF AN RC MODEL PRODUCED BY THE 3D PRINTING

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Jan Rada

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Václav Otipka

**BRNO 2021**



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Jan Rada**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení  
Vedoucí práce: **Ing. Václav Otipka**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Konstrukční návrh planetové převodovky RC modelu vyráběného metodou 3D tisku**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Bakalářská práce je zaměřena především na vytvoření optimalizovaného konstrukčního návrhu planetové převodovky pro RC model terénního automobilu. Maximální množství komponent RC modelu bude vyráběno dostupnou metodou hobby 3D tisku.

#### **Cíle bakalářské práce:**

Provést rešerši v oblasti aktuálních technologií 3D tisku a využívaných materiálů.  
Vlastní zhodnocení používaných metod pro 3D tisk a výběr vhodné metody pro hobby uživatele.  
Vypracovat konstrukční návrh planetové převodovky pro RC model terénního automobilu v souladu se zadanými požadavky. Finální konstrukční návrh bude reprezentován 3D daty ve zvoleném CAD modeláři.  
Vytvořit výkres sestavení.  
Vytvořit výrobní výkresy tří zvolených komponent, pokud by byly vyráběny metodami konvenčního obrábění.

### **Seznam doporučené literatury:**

SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. Brno: VUTIMUM, c2010. ISBN 978-80-214-2629-0.

GIBSON, Ian, David W. ROSEN a Brent STUCKER. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. New York: Springer Science + Business Media, 2010. ISBN 978-1-4419-1119-3.

NOORANI, Rafiq. 3D Printing: Technology, Applications, and Selection. Boca Raton: CRC Press, c2018. ISBN 978-1-4987-8375-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem planetové převodovky vyráběné metodou 3D tisku. První část je zaměřena na řešení v oblasti aktuálních technologií a materiálů 3D tisku. Popsán je zde výrobní postup pro technologii FDM a teorie planetových převodů. Druhá část je zaměřena na návrh převodovky, aby splňovala vstupní parametry a bylo ji možno vyrábět metodou 3D tisku. Popsán je zde postup návrhu od výpočtu přes modelování až po samotný tisk převodovky.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Planetová převodovka, 3D tisk, FDM, PLA

## ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the design of a planetary gearbox produced by 3D printing. The first part is focused on research in the field of current technologies and 3D printing materials. The production process for FDM technology and the theory of planetary gears are described here. The second part is focused on the design of the gearbox to meet the input parameters so it could be produced by 3D printing. The design process from the calculation through modelling to the actual printing of the gearbox is described here.

## KEYWORDS

Planetary gearbox, 3D printing, FDM, PLA

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

RADA, Jan. Konstrukční návrh planetové převodovky RC modelu vyráběného metodou 3D tisku. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131966>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí diplomové práce Václav Otipka.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Václava Otipky a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 21. května 2021

.....

Jan Rada

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu práce panu Ing. Václavu Otipkovi, za jeho čas, cenné připomínky a ochotu při zpracovávání mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, blízkým a přátelům za pomoc a podporu nejen u této práce, ale v celém průběhu studia.



# OBSAH

<b>Úvod .....</b>	<b>11</b>
<b>1 Technologie 3D tisku .....</b>	<b>12</b>
1.1 FDM (Fused Deposition Modeling) .....	12
1.1.1 Rozdělení FDM tiskáren.....	12
1.1.2 Komponenty FDM tiskárny.....	14
1.2 SLA (stereolitografie) .....	16
1.2.1 Rozdělení SLA tiskáren.....	17
1.3 SLS (Selective Laser Sintering).....	18
<b>2 Proces FDM 3D tisku .....</b>	<b>19</b>
2.1 Tvorba CAD modelu .....	19
2.2 Převod CAD modelu do formátu souboru STL .....	19
2.3 Tvorba G-Codu .....	20
2.4 Vytisknutí modelu.....	22
2.5 Postprocessing .....	22
<b>3 Materiály pro 3D tisk .....</b>	<b>23</b>
3.1 Materiály pro tisk na FDM tiskárnách .....	23
3.1.1 PLA.....	23
3.1.2 PETG .....	24
3.1.3 ABS .....	24
3.1.4 ASA .....	24
3.1.5 FLEX .....	24
3.1.6 Kompozitní materiály .....	24
3.1.7 Podpůrné materiály PVA.....	24
3.1.8 Ostatní materiály .....	25
3.2 Materiály pro tisk na SLA tiskárnách .....	25
<b>4 Planetový mechanismus .....</b>	<b>26</b>
4.1 Princip planetového mechanismu .....	26
4.2 Planetová převodovka.....	28
4.3 Diferenciál .....	29
<b>5 Návrh planetové převodovky.....</b>	<b>30</b>
5.1 Motor automobilu .....	30
5.2 Výpočet převodovky .....	31
5.2.1 Výpočet planetového převodu .....	32
5.2.2 Parametry druhého a třetího stupně převodovky .....	34
5.3 Kinematika převodovky.....	34
5.4 Model převodovky .....	35
5.4.1 Skříň převodovky .....	36
5.4.2 Model planetového mechanismu .....	37
5.4.3 Hřídel mezi druhým a třetím stupněm.....	37
5.4.4 Model výstupní hřídele.....	38
<b>6 Tisk a montáž převodovky.....</b>	<b>39</b>
6.1 Materiál pro tisk převodovky.....	39

6.2	Nastavení tisku v programu PrusaSlicer .....	39
6.3	Tiskárna Prusa i3 MK3S .....	42
6.4	Průběh tisku.....	42
6.5	Sestavení převodovky.....	43
<b>Závěr .....</b>		<b>45</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>		<b>49</b>
<b>Seznam příloh.....</b>		<b>50</b>

## ÚVOD

3D tisk je zcela automatizovaný a vysoce flexibilní proces, kdy se z digitální předlohy (3D modelu) vytváří fyzický model. 3D tisk spadá pod takzvanou aditivní výrobu, kdy se materiál postupně přidává a vzniká tedy minimum odpadu. 3D tisk vznikl roku 1984, kdy si zakladatel společnosti 3D Systems Charles W. Hull nechal patentovat technologii takzvané stereolitografie (dnes běžně označována jako SLA). Postupně se 3D tisk rozšířil do mnoha odvětví průmyslu jako je letecký, automobilový, stavební, hračkářský, ale třeba také lékařský průmysl, kde se 3D tisk využívá pro vytvoření přesného modelů orgánů, které budou transplantovány, pro lepší představu o jejich velikosti. Důležitým rokem pro 3D byl také rok 2005, kdy byl založen na Univesity of Bath doktorem Adrianem Bowqerem projekt RepRap. Projekt spočíval v navrhnutí 3D tiskárny, která bude schopná si vytisknout maximum vlastních součástek. Tento projekt byl také zlomový ve vývoji 3D tiskáren, jelikož byl koncipován pod licencí open source, tedy všechny zdrojové kódy jsou veřejně a zdarma přístupné, proto se do projektu mohli zapojit nadšenci z celého světa. Díky tomuto projektu se dostala cena tiskáren pod hranici sto tisíc korun a tiskárny se staly rozšířenými v hobby a polo profi segmentu [1].

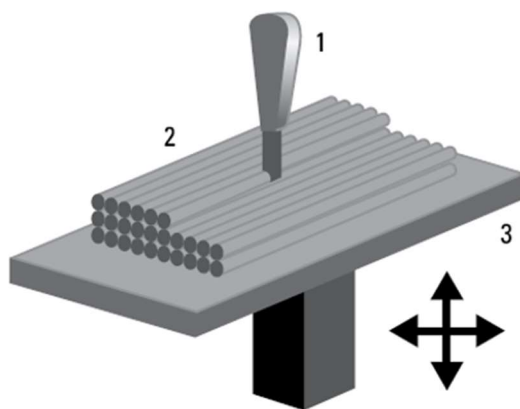
V hobby segmentu je 3D tisk oblíben hlavně díky svým možnostem vytvářet vlastní návrhy relativně levně a rychle. Díky 3D tiskárnám si může každý vytvořit vlastní figurku nebo třeba vyrobít náhradní díly pro opravu starožitností a starých domácích spotřebičů, kdy náhradní díly nejsou dostupné nebo jsou naopak příliš drahé. V neposlední řadě jej využívají také modeláři pro tisk různých součástí, ať už pro statické nebo RC modely různých velikostí. Jedním ze zajímavých projektů společnosti 3Dsets je právě návrh takového RC modelu automobilu, kdy je většina součástek tištěna na FDM 3D tiskárnách.

# 1 TECHNOLOGIE 3D TISKU

3D tisk můžeme rozdělit různými způsoby, v závislosti na fyzice procesu, zdroji energie, druhu materiálu, velikosti prototypu atd. Nejčastěji se 3D tisk kategorizuje podle původní formy suroviny na pevné bázi (FDM), kapalně bázi (SLA) nebo na prášku (SLS).

## 1.1 FDM (FUSED DEPOSITION MODELING)

Tato technologie je jedna z neznámějších a nejpoužívanějších mezi širokou veřejností. Tiskovým materiálem je tisková struna (filament). Materiál prochází hlavou tiskárny, kde je nahříván a natavován. Natavený materiál je pomocí trysky nanášen postupně na pevný základ, vrstvu po vrstvě, jak jde vidět na Obr. 1. Výsledkem je 3D objekt, který je složen z několika vrstev na sobě [2].



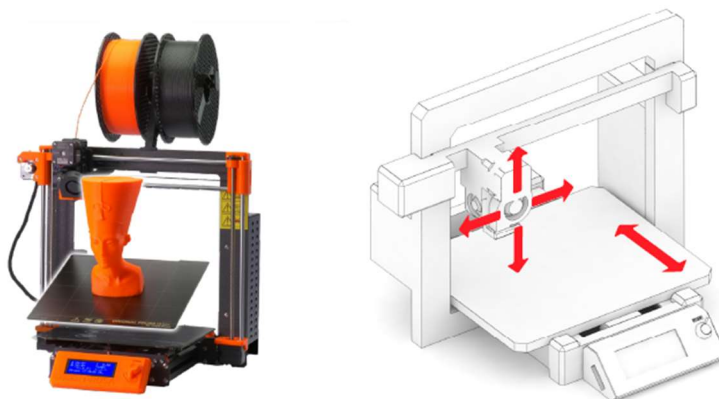
Obr. 1 Technologie FDM [2]  
1. Tisková hlava, 2. Tisknutý objekt, 3. Podložka

### 1.1.1 ROZDĚLENÍ FDM TISKÁREN

FDM tiskárny můžeme rozdělit podle způsobu pohybu v prostoru na čtyři kategorie. Kartézská, delta, polar a scara [6].

#### KARTÉZSKÁ

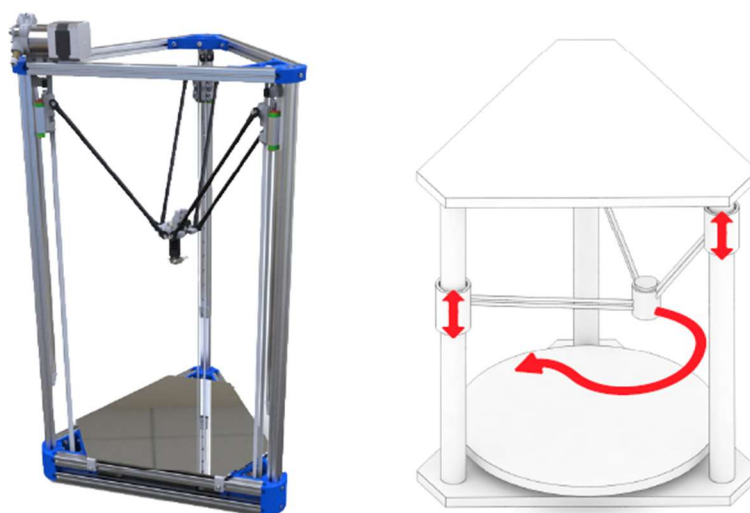
Kartézská tiskárna se pohybuje lineárně ve třech osách, kdy tisková hlava (extruder) se pohybuje v osách X (pohyb doleva a doprava), Z (pohyb nahoru a dolů) a podložka v ose Y (pohyb dopředu a dozadu), lze vidět na Obr. 2 [6].



Obr. 2 Kartézská tiskárna [1]

## DELTA

Delta tiskárna má extruder zavěšený na třech ramenech, která jsou spojena v místě tiskové hlavy. Ramena jsou připojena k vozíkům uloženým na lineárních kolejnicích a k řemenům. Delta tiskárna koordinovaným pohybem tiskové hlavy na ramenech vytváří model. Ukázku pohybů a konstrukci delta tiskárny vidíme na Obr. 3. Oproti kartézské tiskárně tiskne rychleji z důvodu lehčího extruderu a také má větší tiskový prostor, především v ose Z. Nevýhodou však je složitější kalibrace tiskárny a také, že tiskárna tiskne na kruhovou podložku [6].



Obr. 3 Delta tiskárna [1]

## POLAR

U polar tiskárny se využívá systému založeném na polárním pohybu tiskové hlavy po dvou osách a rotační podložce. Na Obr. 4 vidíme konstrukci polar tiskárny. Systém je konstrukčně velmi jednoduchý, avšak komplikovaná je příprava modelu pro tisk [1].



*Obr. 4 Polar tiskárna [1]*

## SCARA

Tiskárna typu scara je používána velmi málo a je určena především nadšencům. U tohoto typu tiskárny svírá tiskovou hlavu dvojice mechanických paží, které s ní pohybují a zároveň se celý mechanismus pohybuje v ose Z. Tisková podložka se zde nehýbe a nemusí být nutně spojena s konstrukcí tiskárny[6].

### 1.1.2 KOMPONENTY FDM TISKÁRNY

Komponenty pro všechny druhy FDM tiskáren jsou si, z konstrukčního hlediska, velmi podobné. Mezi nezbytné komponenty tiskárny patří hotend, extruder, vyhřívaná podložka, rám a řídicí elektronika.

## HOTEND

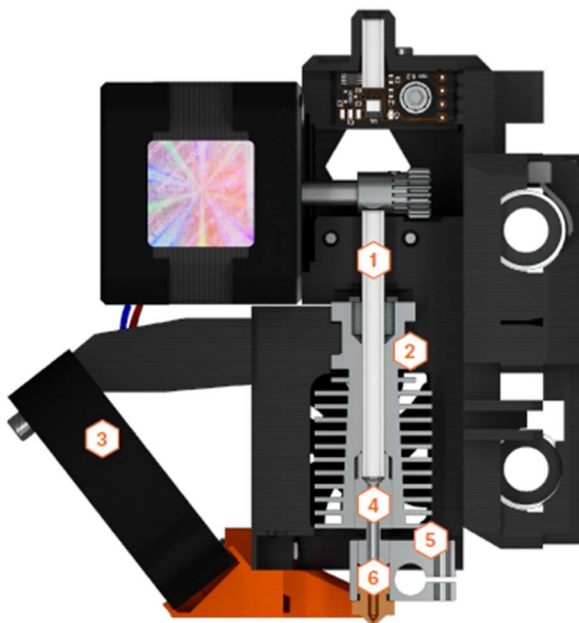
Hotend je součástí tiskové hlavy a je to sestava dílů, které se starají o zahřátí a chlazení přiváděného materiálu. Hotend se skládá z trysky, heater blocku, heat sinku (chladiče) a heat breaku (izolátoru) [6].

Heater block se nachází ve spodní části tiskové hlavy. Je tvořen materiálem, který dobře vede teplo, nejčastěji hliníkem. Heater block obsahuje trysku a elektrické topné těleso, které se stará o zahřívání materiálu. Heat sink neboli chladič je většinou žebrovaný pro lepší odvod tepla, jeho hlavním úkolem je odvádění tepla, které se šíří od heater block přes heat break. Chladič se nachází ve vrchní části tiskové hlavy. Heat sink bývá často doplněn o přídavný ventilátor pro zvětšení účinnosti chlazení. Heater block a heat sink spojuje heater break (izolátor), což je trubička v jednom místě výrazně zúžená na co nejmenší průřez, kvůli omezení přenosu tepla. Úkolem izolátoru je přerušit vedení tepla ze spodní části tiskové hlavy [6].

## EXTRUDER

K zavádění materiálu do tiskové hlavy slouží extruder. Extruder se skládá z teflonové trubičky a podávacího mechanismu, který je tvořen ozubenými koly a krokovým motorem. Podle

umístění můžeme extruder rozdělit na dva typy, a to na direct drive extruder a bowden extruder. U direct drive extruderu je podávací mechanismus přímo součástí tiskové hlavy. Výhodou tohoto typu je přesnější posuv materiálu s minimem prokluzu, nevýhodou však je těžší tisková hlava. V případě bowden extruderu není podávací mechanismus součástí tiskové hlavy, ale je nehybně připevněn k rámu tiskárny. Výhodou je lehčí tisková hlava a tudíž i její rychlejší posuv. Problém nastává v délce bowdenu (trubičky), čím delší je, tím větší je pravděpodobnost chyb při pohybu s materiálem vlivem odporu bowdenu [6].



*Obr. 5 Tisková hlava [1]*

*1. Extruder, 2. Heatsink (Chladič), 3. Ventilátor, 4. Heat break, 5. Heater block, 6. Tryska*

## **TISKOVÁ PODLOŽKA**

Při FDM tisku je naprosto zásadní, aby se první vrstva přilepila k podložce. Pokud se první vrstva nepřilepí, tak další na ni nebude navazovat a tisk se pokazí. Nejlevnější volbou podložky je skleněná nevyhřívaná podložka. Nevýhodou je, že pro zvýšení adheze se musí na sklo nanášet lepidlo, lak na vlasy nebo modelářské pásky. Moderní tiskárny využívají vyhřívané podložky, které jsou vyhřívané přes odporový drát a tím výrazně zvyšují adhezi mezi podložkou a extrudovaným materiálem. Pro ještě lepší adhezi se využívá pružného plechu s PEI (ultem) povrchem. Ten se pokládá na vyhřívanou podložku a po dokončení tisku se model od plechu jednoduše odloupne [6].

## **RÁM**

Rám tvoří nosnou konstrukci 3D tiskárny. Výsledná kvalita tisku je ovlivněna tuhostí a přesností rámu. U rámu je požadována co největší robustnost a pevnost, což omezuje vibrace a tím umožní zkrácení doby tisku [1].

## KROKOVÉ MOTORY

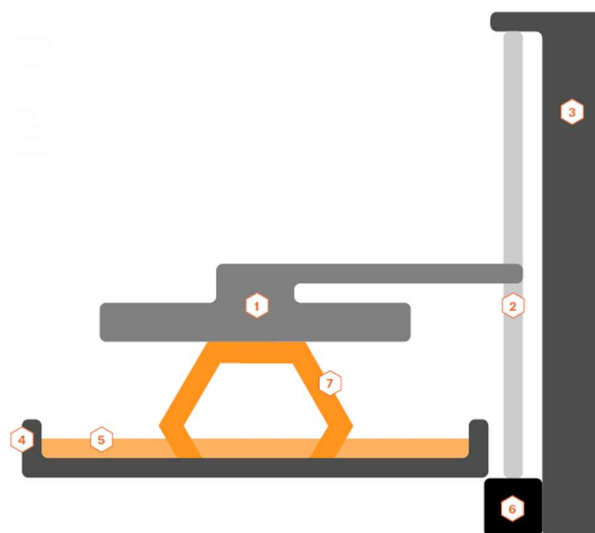
Motor má definovanou velikost kroku a jeho úkolem je zajistit pohyb extruderu a tiskové podložky v 3D prostoru. Krokový motor také zajišťuje podávání tiskového materiálu do extruderu [1].

## ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA

Řídící jednotka je mozkem celé tiskárny. Má za úkol čtení a zpracovávání vstupního textového souboru, podle kterého nastavuje teplotu nahřívání trysky a podložky, a řídí pohyb jednotlivých krokových motorů [1].

## 1.2 SLA (STEREOLITOGRAFIE)

SLA technologie využívá k vytvoření objektu zaostřené ultrafialové světlo k transformaci kapalného fotopolymeru do pevné formy. Proces se uskutečňuje na pohybující se podložce. Podložka je ponořena do kapaliny natolik, aby se nasvítila pouze potřebná místa, a tím vznikla jedna vrstva [2]. Podložka se postupně posouvá směrem vzhůru a objekt vzniká vrstvu po vrstvě. Uspořádání dílu tiskárny vidíme na Obr. 6. Technologie SLA vyniká oproti technologii FDM detailnějším tiskem (na objektu nejsou patrné vrstvy), nevýhodou však je delší doba tisku a menší tisková plocha [1]. Technologie SLA se v domácím tisku nevyužívá příliš často. Jde sice o kvalitnější tisk, ale oproti FDM tiskárnám má vyšší pořizovací cenu a také menší tiskovou plochu.



Obr. 6 SLA tiskárna [1]

1. Tisková plocha, 2. Vodící šroub, 3. Osa Z, 4. Vanička, 5. Fotopolymer, 6. Krokový motor, 7. Tištěný objekt

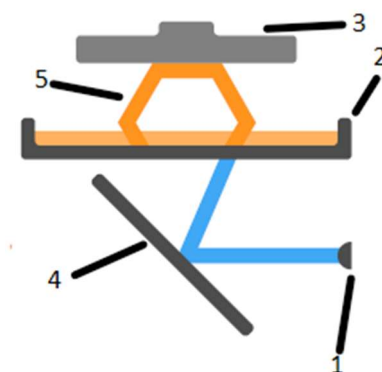


### 1.2.1 ROZDĚLENÍ SLA TISKÁREN

SLA proces má tři hlavní kategorie. Odlišují se způsobem osvětlení a vytvrzování polymeru. Rozdíly mezi nimi jsou v době a kvalitě tisku.

#### SLA - LASER

Tento typ tiskárny využívá UV laserový paprsek, který je směřován pomocí dvou zrcadel a postupně vytvrzuje tiskovou vrstvu (Obr. 7). Kvůli postupnému vykreslování vrstvy je doba tisku závislá na ploše a počtu dílů – čím větší plocha a počet dílů, tím delší doba tisku [1].

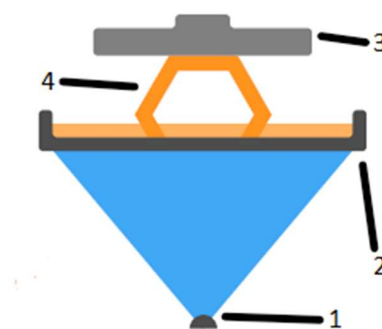


Obr. 7 Tiskárna SLA – Laser [1]

1. Laser, 2. Vanička, 3. Tisková plocha, 4. Zrcadlo, 5. Tištěný objekt

#### DLP (DIGITAL LIGHT PROCESSING)

U této technologie se celá jedna vrstva osvětluje najednou pomocí digitálního projektoru (Obr. 8) a v místě osvětlení dochází k vytvrzení. To výrazně zkracuje dobu tisku. Nezáleží na ploše a počtu dílů, doba tisku jedné vrstvy je vždy stejná [1].



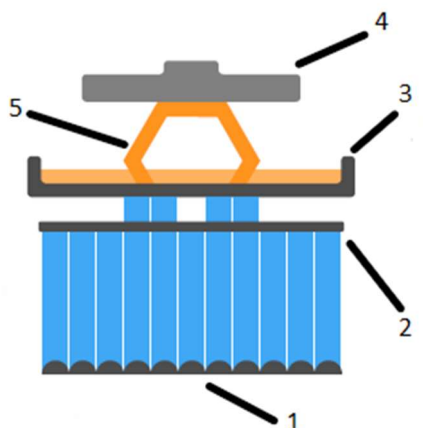
Obr. 8 Tiskárna DLP [1]

1. Digitální projektor, 2. Vanička, 3. Tisková plocha, 4. Tištěný objekt

#### MSLA (MASK STEREOLITHOGRAPHY)

MSLA technologie využívá UV LED a maskování celé tiskové vrstvy LCD displejem (Obr. 9). LCD displej aktivuje pixely (těmi projde světlo) podle tvaru jedné vrstvy. UV LED osvítí celou

plochu displeje, ale projde pouze tam, kde jsou aktivované pixely. Jedna vrstva se vytvrzuje celá najednou, tudíž nezáleží na ploše vrstvy a počtu dílů. Doba tisku vrstvy bude stejná [1].

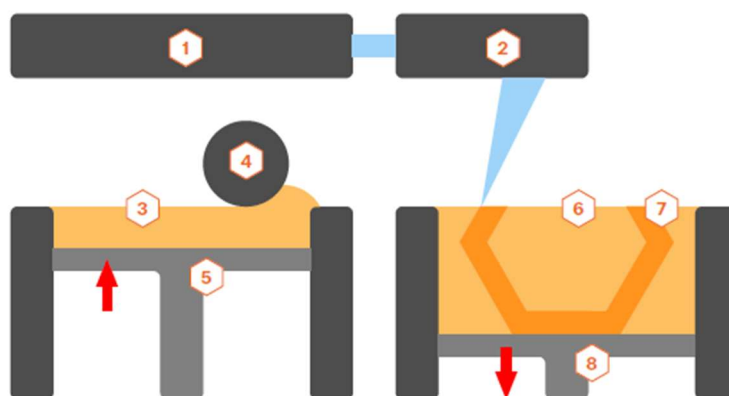


Obr. 9 Tiskárna MSLA [1]

1. UV LED, 2. LCD displej, 3. Vanička, 4. Tisková plocha, 5. Tištěný objekt

### 1.3 SLS (SELECTIVE LASER SINTERING)

SLS využívá laser pro slinování práškového materiálu do tvaru objektu. Technologie je podobná technologii SLA, s tím rozdílem, že materiál se u SLS natavuje a sintruje (spéká), kdežto u SLA se vytvrzuje z kapaliny do pevné formy. Proces probíhá tak, že váleček vždy nanese tenkou vrstvu termoplastického prášku (využívají se i kovy) a laser sintruje plochu jedné vrstvy (Obr. 10). Ve chvíli, kdy je vytvořena jedna vrstva, váleček nanese další vrstvu prášku a proces se opakuje [2]. Tato technologie není příliš rozšířena a je pro domácí tisk nevhodná kvůli vysoké pořizovací ceně tiskáren.



Obr. 10 Technologie SLS [1]

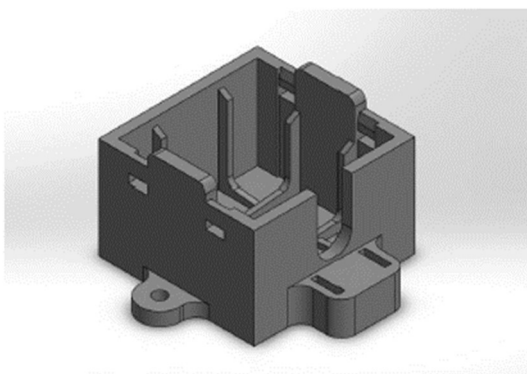
1. Laser, 2. Systém skenování, 3. Zásobník s práškem, 4. Váleček, 5. Systém podávání prášku, 6. Práškové lůžko, 7. Tištěný objekt, 8. Pohyblivé dno

## 2 PROCES FDM 3D TISKU

U FDM 3D tisku se proces skládá z pěti základních, na sebe navazujících, kroků. Nejdříve je třeba získat geometrický model k tisku. Ten si můžeme obstarat na příslušných stránkách nebo si jej vymodelovat svépomocí. Poté je nutné převést model do formátu souboru STL. Tento soubor se posléze zpracuje do softwarového nástroje zvaného slicer za účelem vytvoření G-Code, který obsahuje pracovní instrukce pro ovládání tiskárny. Závěrečnými kroky jsou vytisknutí 3D modelu a postprocessing [3].

### 2.1 TVORBA CAD MODELU

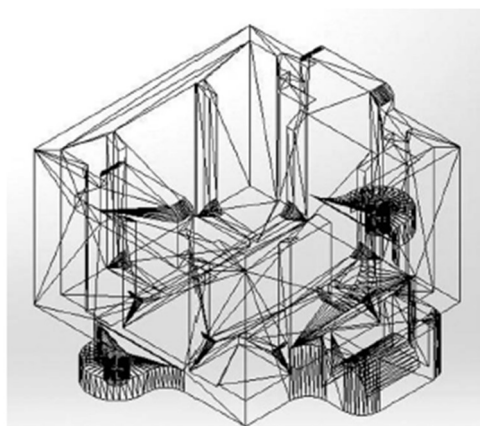
Prvním krokem je vytvoření CAD modelu 3D součásti. U 3D tisku musí mít součást plně uzavřenou geometrii. Těleso je objem, který je zcela ohraničen povrchy, což znamená, že všechny hrany musí být shodné pouze s jednou hranou dalšího povrchu [3]. Model se navrhuje tak, abychom minimalizovali počet podpěr a usnadnili tak proces tisku. 3D tiskárna neumí tisknout do volného prostoru, takže se musí vždy vhodně zvolit orientace modelu na podložce. Model v případě potřeby můžeme rozdělit na více částí a následně je slepit. Toho se využívá u kulatých modelů, aby se nemusely přidávat podpěry [1]. Vhodnou orientaci modelu na podložce můžeme vidět na Obr. 11.



Obr. 11 Ukázka CAD modelu [3]

### 2.2 PŘEVOD CAD MODELU DO FORMÁTU SOUBORU STL

Druhým krokem je převod CAD modelu do formátu STL. Soubor STL přetváří objekt vytvořený v CAD softwaru na sérii trojúhelníků, které společně využívá k přiblížení povrchu objektu. To můžeme vidět na Obr. 12. Trojúhelníku se využívá, protože je pro stroje snadnější sledovat linearitu trojúhelníku než u jiných objektů, a zároveň zachovává integritu objektu. STL soubor je vlastně seznam souřadnic x, y a z, které popisují připojenou sadu trojúhelníků k přiblížení povrchu objektu [3].



*Obr. 12 STL soubor [3]*

## 2.3 TVORBA G-CODU

G-Code je textový soubor, který zpracovává a čte řídicí jednotka 3D tiskárny. Tento krok se také nazývá slicování, neboli převod 3D modelu na strojový G-Code. K převodu slouží program zvaný slicer. Vstupem do sliceru je soubor STL. Dalším vstupem je nastavení řady parametrů určující kvalitu tisku, teploty, chlazení a další. Výstupem z programu je samotný G-Code [1].

Hlavním úkolem sliceru je rozřezání modelu na jednotlivé vrstvy a vytvoření cesty pohybu extruderu ve vrstvách. Dalším úkolem je přidání informací o nastavení. Mezi tato nastavení patří teplota filamentu a podložky, výška vrstvy, perimetry, hustota výplně, podpěry a chlazení [1].

### TEPLOTA TRYSKY A PODLOŽKY

Teplotu trysky pro tavení filamentu je nejlepší volit v rozmezí, které přímo udává každý výrobce. Teplota trysky při tisku se nejčastěji nastavuje od 200 °C do 240 °C, u vyhřívaných podložek se teplota nastavuje od 60 °C do 110 °C. Teplota se mění v doporučeném rozmezí hlavně v závislosti na rychlosti tisku i na základě vizuálních požadavků výtisku [2].

### VÝŠKA VRSTVY

Nastavení výšky vrstvy má zásadní vliv hlavně na dva parametry, kterými jsou doba a rozlišení tisku. U detailnějších výtisků volíme menší výšku vrstvy, abychom dosáhli vyšší kvality vzhledu. Čím je výška vrstvy vyšší, tím jsou více patrné jednotlivé vrstvy. Výška vrstvy výrazně ovlivňuje dobu tisku – čím menší vrstva je, tím delší je také tisk. U tisku však můžeme měnit výšku vrstvy variabilně v jednotlivých částech modelu. U částí, kde se požadují větší detaily, se volí menší výška a u částí, kde není potřeba velkých detailů, se volí vyšší vrstvy [2].

## PERIMETRY

Jedná se o obvodové stěny modelu a nastavujeme jejich počet. Výsledná stěna bude mít šířku přibližně: počet perimetrů x průměr trysky [1].

## VÝPLŇ VRSTVY

Ovlivňuje dobu tisku, pevnost výtisku a spotřebu filamentu. Výplň vrstev se nastavuje v procentech. U vrchních a spodních vrstev, které budou 100 % plné, se nastavuje jejich počet. U běžných výtisků se výplň pohybuje v rozmezí 10–20 % a u dutých 0 % [1].

## PODPĚRY

Podpěry se využívají u části modelů, které svírají s podložkou úhel menší než 45°. Cílem je minimalizovat počet podpěr a použít jich pouze tolik, aby byl tisk úspěšný [3].

## PŘEMOSTOVÁNÍ (BRIDGING)

Využívá se jako jediný způsob, kdy tiskárna může tisknout bez podpěr. Jde o tahání tiskových vláken mezi dvěma body o stejné výšce. U mostu je důležité, aby byl rovnoběžný s tiskovou plochou [1]. Jak vypadá přemostování, můžeme vidět na Obr. 13.

## RAFT

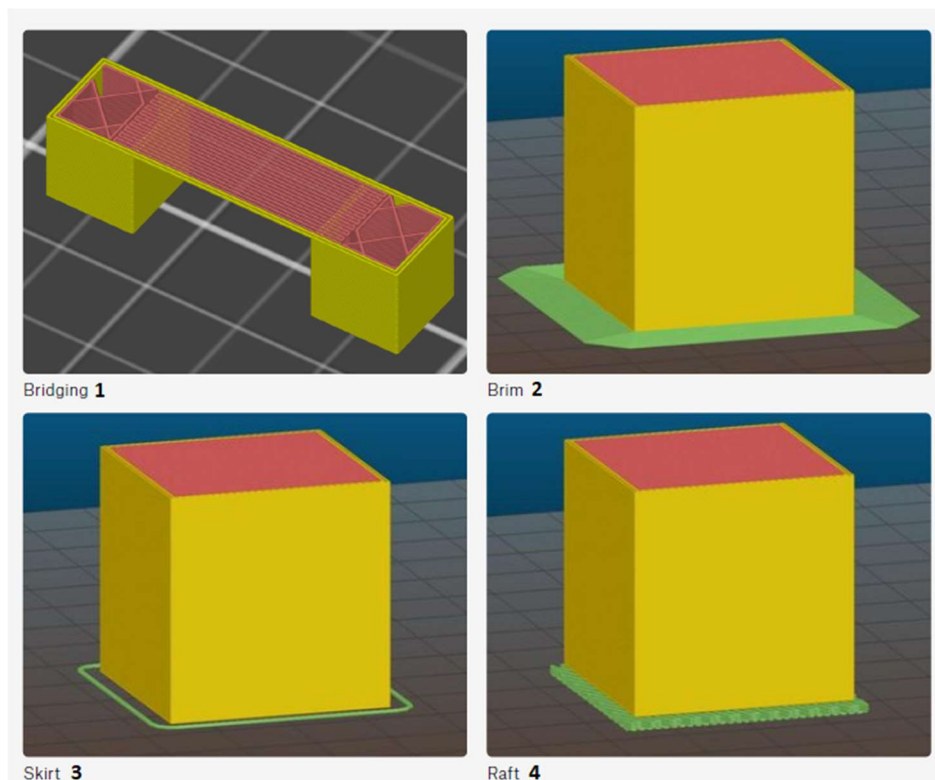
Je to typ podpěry, který se tiskne mezi tištěný model a podložku. Model pak neleží přímo na podložce, ale je zvednutý o výšku raftu, jak je vidět na Obr. 13. Používá se hlavně u materiálu ABS, aby se omezilo kroucení výtisku a zvýšila se jeho přilnavost k podložce [1].

## LÍMEC (BRIM)

Ke zvýšení přilnavosti modelu k podložce se využívá také límec, který se tiskne okolo modelu v první vrstvě. Límec se modelu dotýká a po vytištění modelu se odlomí. Šířka límce bývá různá a závisí na požadované přilnavosti [1]. Využití límce vidíme na Obr. 13.

## OBRYŠ (SKRIT)

Obrys se modelu nedotýká a slouží k vytvoření mikroklima okolo modelu. Z toho důvodu přestane proudit okolo modelu chladný okolní vzduch a nedochází tak k rychlému ochlazení. Využívá se především u materiálu ABS, který se při chladnutí silně smršťuje a má tendenci praskat [1]. Jak vypadá obrys vidíme na Obr. 13.



Obr. 13 Ukázka přemost'ování, raftu, límce a obrysu [1]  
1. Přemost'ování, 2. Límec, 3. Obrys, 4. Raft

## CHLAZENÍ

Využívá se u tisku modelů, kdy je tiskový čas jedné vrstvy příliš krátký, aby se předchozí vrstva stihla dostatečně zchladit a ztuhnout. Typicky se chlazení využívá u vysokých a úzkých modelů [1].

## 2.4 VYTISKNUTÍ MODELU

Čtvrtým krokem je načtení souboru do 3D tiskárny a spuštění 3D tisku. Tisk je u většiny tiskáren plně autonomní proces, u kterého je potřeba jen malý zásah člověka. Tisk je ukončen po úplném vytisknutí součásti. Doba tisku se liší podle zvolené technologie tisku, kvality tisku a počtu součástí k vytisknutí [3].

## 2.5 POSTPROCESSING

Posledním krokem je konečná úprava modelu. Postprocessingem se myslí odstranění přebytečného materiálu a čištění součásti. U technologií SLA a SLS to ještě znamená vytvrzení objektu [3].

### 3 MATERIÁLY PRO 3D TISK

Materiálů pro 3D tisk je mnoho. Jejich hlavní rozdělení je podle hmoty na pevné (technologie FDM), kapalné (technologie SLA) a ve formě prášku (technologie SLS). Při výběru materiálu je důležité se dívat na vlastnosti jako je houževnatost, pevnost, pružnost, tepelná roztažnost a teplená odolnost.

#### 3.1 MATERIÁLY PRO TISK NA FDM TISKÁRNÁCH

Materiál pro tisk na FDM tiskárnách se vyrábí ve formě vláken, takzvaně filamentu (Obr. 14). Vlastnosti každého materiálu filamentu jsou vždy specifické pro danou směs materiálu. Pro úspěšný tisk se musí vždy pro každý materiál použít rozdílné tiskové nastavení, které bude zvolenému materiálu vyhovovat (teploty, rychlosti ventilátoru, rychlosti tisku, průtok materiálu) [1].



Obr. 14 Tiskové struny [1]*Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.*

##### 3.1.1 PLA

PLA je termoplastický materiál, který je cenově dostupný a jeden z nejpoužívanějších při 3D tisku. PLA se používá při tisku malých a detailních objektů. Materiál patří mezi ekologické, jelikož je biologicky odbouratelným polymerem vyrobeným z cukrových rostlin jako kukuřice, tapioka a cukrová třtina. PLA se taví při nízkých teplotách okolo 160 °C a lepí se při 180 °C, což znamená, že materiál nevyžaduje vyhřívanou podložku. PLA má malou teplotní roztažnost, a proto nemá tendenci praskat. Jde o materiál, který je tvrdý, ale zároveň křehký. Není vhodný pro mechanické namáhání, kdy se neohne, ale spíš praskne. Je také málo teplotně odolný, měkne při teplotě okolo 60 °C a také patří k materiálům, které jsou málo odolné vůči povětrnostním podmínkám [2].

### 3.1.2 PETG

PETG je velmi houževnatý materiál s dobrou tepelnou odolností. Materiál má taky velmi malou tepelnou roztažnost, díky které se na podložce nekrouť a není s ním problém tisknout velké modely. Oproti PLA má lepší mechanické vlastnosti, při namáhání je schopen se dočasně prohnut, což zabraňuje prasknutí [7].

### 3.1.3 ABS

ABS je pružnější materiál, který má lepší vlastnosti při mechanickém namáhání, kdy je schopný se do určité míry ohnout. Využívá se k různým aplikacím, od průmyslových až po výrobu hraček, jako jsou kostky stavebnice Lego. Kvalita vlákna se během výroby dobře a snadno kontroluje. Materiál ABS má vyšší teplotu tání a má menší tření při průchodu extruderem. Při tisku má tendenci se kroutit a odlepovat od podložky. Při tisku s ABS je nutné vyhřívat podložku, jelikož se jedná o materiál s vysokou smrštivostí. Materiál také při tisku mírně zapáchá, proto je nutné při tisknutí větrat [3].

### 3.1.4 ASA

ASA je nástupce materiálu ABS. ASA je oproti ABS UV stabilní, při tisku se méně smršťuje a také při tisku mnohem méně zapáchá. Součásti vytisknuté z materiálu ASA jsou pevné, houževnaté a tepelně odolné (deformace se projevuje od teplot okolo 93 °C). Materiál je díky svým vlastnostem vhodný pro dlouhodobé venkovní použití [7].

### 3.1.5 FLEX

Do této kategorie spadají materiály ohebné, které se chovají podobně jako guma. Při ohnutí nepraskají, ale ohýbají se. Materiály FLEX se vyrábí v několika stupních tvrdosti. Čím je materiál měkčí, tím je tisk náročnější. Využívají se při výrobě kol pro modely aut, obalů na mobilní telefony a dalších [1].

### 3.1.6 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály, jako jsou woodfill, copperfill, bronzefill, karbonové a další, jsou složeny ze dvou složek. Hlavní složkou je plast a sekundární je materiál ve formě prachu. Tyto materiály se používají především díky svému vzhledu. Jde o materiály velmi abrazivní, proto se doporučuje při tisku využít tvrzené trysky [1].

### 3.1.7 PODPŮRNÉ MATERIÁLY PVA

Tyto materiály jsou rozpustné ve vodě. Díky tomu se využívají při tisku, kdy jsou potřeba podpory. Nevýhodou je však dražší cena a nutnost mít tiskárnu, která umožňuje tisk dvou a více materiálů [1].



### 3.1.8 OSTATNÍ MATERIÁLY

Do této skupiny patří PP materiály a Nylon. PP materiály mají vyšší tepelnou odolnost než ABS nebo PLA, ale mají problémy s přilnavostí k tiskové podložce. Nylon je odolný a pevný materiál s vysokou adhezí mezi vrstvami, je odolný vůči tření (vhodný pro mechanické díly) a je hygroscopický (absorbuje vzdušnou vlhkost), což má negativní vliv na tisk [1].

## 3.2 MATERIÁLY PRO TISK NA SLA TISKÁRNÁCH

Pro tisk na SLA tiskárnách se využívají fotopolymery. Jsou to tekuté materiály, které se vytvrzují světelným paprskem. Tisk fotopolymery je dražší než z filamentu (PLA, ABS). Díly vytisknuté z fotopolymerů jsou křehčí než díly vytisknuté na FDM tiskárnách. Avšak SLA díly nepraskají po vrstvách, ale lámou se podobně jako sklo [1].

Fotopolymery se skládají ze tří hlavních složek – jádra pryskyřice (monomery a oligomery), fotoiniciátorů (molekuly, které reagují při dopadu UV záření) a přísad (mění vzhled a charakteristiky, typicky pigmenty a barviva) [1].

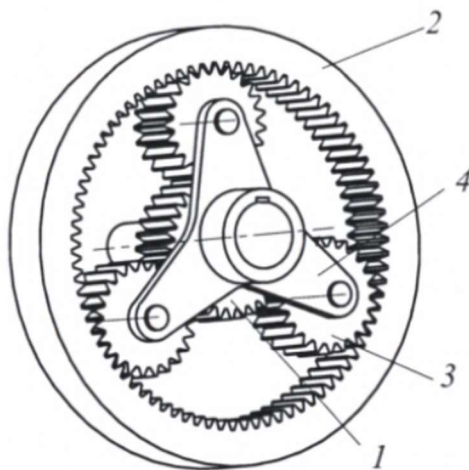
Fotopolymery jsou ve své podstatě jen jedny. To znamená, že je nerozdělujeme podle typu materiálu, jak u filamentů pro FDM tiskárny, ale podle přídatných směsí a barviv. Hlavními parametry jsou stupeň tvrdosti a houževnatost [1].

## 4 PLANETOVÝ MECHANISMUS

Planetový mechanismus je nejčastěji využíván v planetových převodovkách, kde slouží k přenosu točivého momentu z hnacího členu na člen hnaný a také v diferenciálech, ve kterých je planetový mechanismus s kuželovým soukolím [8].

### 4.1 PRINCIP PLANETOVÉHO MECHANISMU

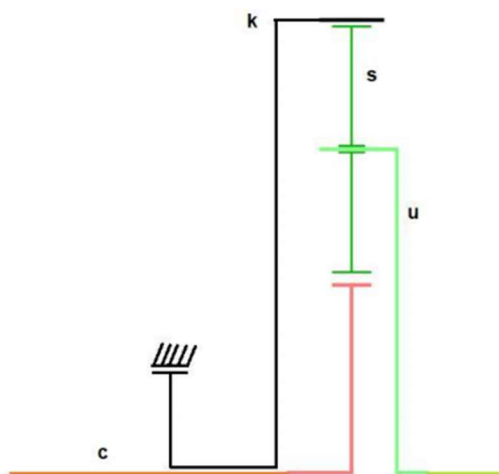
Planetový mechanismus se skládá ze tří ozubených kol (centrální kolo, korunové kolo, satelit) a unašeče, na kterém jsou uloženy satelity (Obr. 15). U planetového soukolí vykonává satelit současně dvě rotace, otáčí se kolem své vlastní osy a kolem osy rotace. Kolem osy rotace se otáčí centrální kolo, korunové kolo i unašeč [11].



Obr. 15 Planetový mechanismus [11]  
1. Centrální kolo, 2. Korunové kolo, 3. Satelit, 4. Unašeč

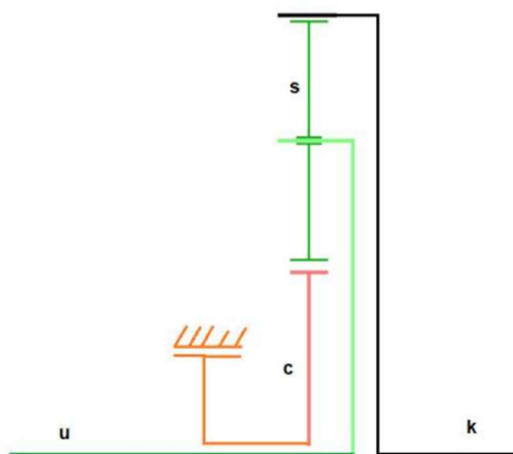
Bržděním jednotlivých částí planetového mechanismu dosáhneme změny převodového poměru a směru otáčení. Také záleží, na který člen mechanismu je přiveden krouticí moment a ze kterého je odebírán. Podle toho bude mechanismus fungovat jako reduktor nebo multiplikátor [12].

Při zabrzděném korunovém kole (Obr. 16) dosáhneme velkého převodového poměru a nezmění se smysl otáčení. Pokud bude moment přiváděn na centrální kolo a odebírán z unašeče, půjde o převod do pomala (velká redukce). Pokud bude moment přiváděn na unašeč a odebírán z centrálního kola, půjde o převod do rychla (velký rychloběh) [12].



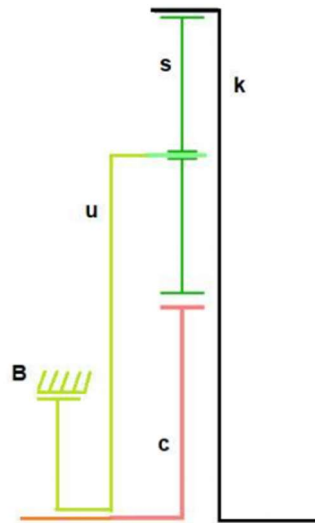
Obr. 16 Zastavené korunové kolo [12]

Při zabrzděném centrálním kole (Obr. 17) dosáhneme menšího převodového poměru, než při brždění korunového kola, a nebude se měnit smysl otáčení. Pokud budeme přivádět moment na korunové kolo a odvádět z unašeče, půjde o malou redukci (převod do pomala). Při vstupu na unašeč a výstupu z korunkového kola půjde o malý rychloběh [12].



Obr. 17 Zastavené centrální kolo [12]

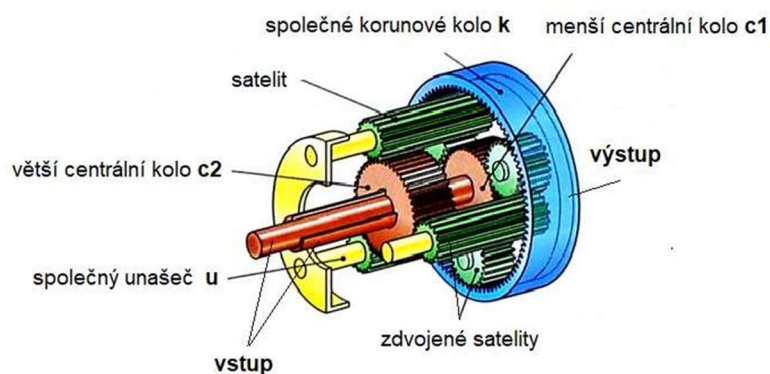
Když bude zastaven unašeč (Obr. 18), dojde ke změně smyslu otáčení. Pokud bude moment přiváděn na korunové kolo a odebrán z centrálního, půjde o zpětný rychloběh (převod do rychla). Pokud bude moment přiváděn na centrální kolo a odebrán z korunkového, půjde o zpětnou redukci (převod do pomala) [12].



Obr. 18 Zastavený unašeč [12]

## 4.2 PLANETOVÁ PŘEVODOVKA

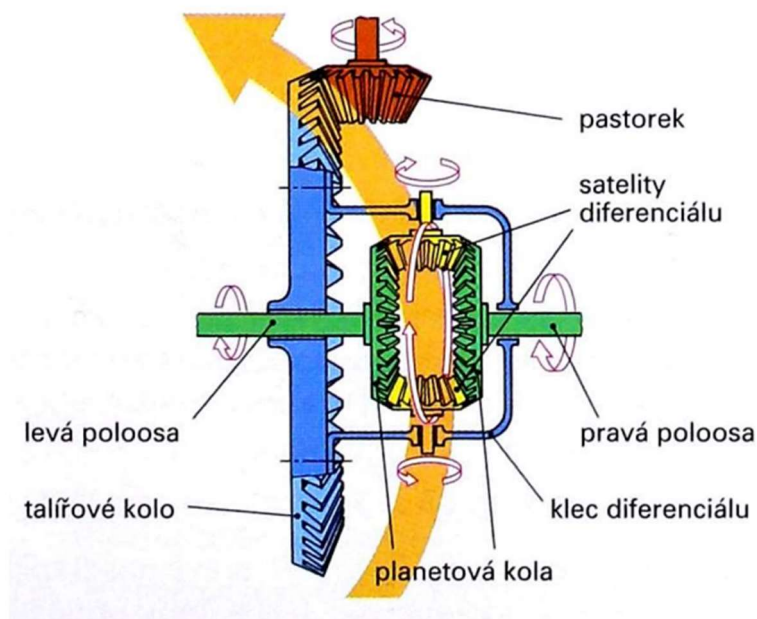
Planetová převodovka se využívá v mnoha odvětvích. Můžeme se s ní setkat v automobilech, zvedacích zařízeních, zemědělských strojích, obráběcích strojích, mixérech atd. Výhodou planetových převodovek je možnost řazení převodových stupňů pod zatížením, malé rozměry, vysoká účinnost a vysoký převodový poměr. Nevýhodou je velká složitost převodovky a velký počet součástí při větším počtu převodových stupňů. Planetového mechanismu využívá například převodovka typu Ravigneaux (Obr. 19) [12].



Obr. 19 Planetová převodovka typu Ravigneaux [12]

### 4.3 DIFERENCIÁL

Planetový mechanismus se využívá také v diferenciálech. Diferenciál se používá ve všech automobilních, nákladních, zemědělských strojích. Diferenciál má za úkol umožnit rozdílné otáčky hnaných kol (např. průjezd zatáčkou) a rozdělit točivý moment na hnací hřídele, nebo mezi nápravy [13]. Jednoduchý kuželový diferenciál můžeme vidět na Obr. 20.



Obr. 20 Jednoduchý kuželový diferenciál [13]

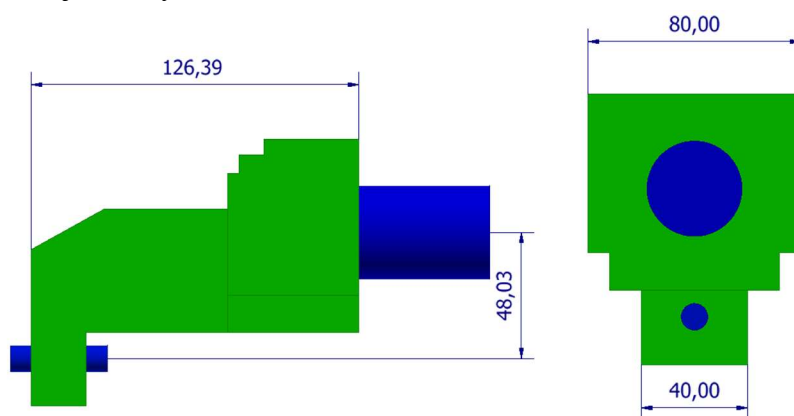
## 5 NÁVRH PLANETOVÉ PŘEVODOVKY

Převodovka bude využívána v RC modelu terénního automobilu s pohonem 4x4. Toto auto již plně jezdí a využívá vícestupňovou převodovku s neměnným převodovým poměrem. Automobil je celý vyráběn metodou 3D tisku, až na součásti jako jsou šrouby, matice a ložiska. Jednotlivé díly automobilu se tisknou a následně sestavují podle návodu jako u stavebnice Lego. Jak vypadá model RC auta můžete vidět na Obr. 21. Model auta měří cca. 53 cm na délku. Model je replikou Jeepu v měřítku 1:8.



Obr. 21 Model terénního automobilu

Návrh nové převodovky pro model vzniknul z důvodu rychlého opotřebení některých ozubených kol v současné převodovce. Proto je při návrhu využito planetového mechanismu, ve kterém se jednotlivé síly v ozubení lépe rozdělují a přitom mechanismus nezabere velký prostor. Při návrhu byly zadány tři hlavní parametry převodovky. Jak už je zmíněno, převodovka musí být planetová, musí dosahovat převodového poměru 20:1 (převod do pomala) a musí respektovat zadaný zástavbový prostor. U zástavbového prostoru bylo také nutné zachovat rozměry, ve kterých vstupuje krouticí moment do převodovky, a ve kterých vystupuje z převodovky. Model zástavbového prostoru je ukázán na Obr. 22. Dále je u převodovky požadavek na použití jednotných ložisek 6700ZZ.



Obr. 22 Zástavbový prostor

### 5.1 MOTOR AUTOMOBILU

O pohon auta se stará standardní stejnosměrný komutátorový motor velikosti 540, který je napájený dvoučládkovou baterií Li-Pol se vstupním napětím 7,4 V. Parametry motoru jsou

uvedeny v Tab. 1. Motor má definovanou čelní přírubu, pomocí které je uchycen pevně přímo k tělu převodovky.

Tab. 1 Specifikace motoru

Charakteristiky	Parametry
Napětí	4,8 ~ 9,6 V
Bez zátěže	23 400 min <sup>-1</sup> ; 9,6 V; 1,6 A
Maximální účinnost	20 040 min <sup>-1</sup> ; 9,55 V; 6,8 A
Točivý moment	316 g·cm <sup>-1</sup>
Velikost hřídele	3,175 mm
Délka hřídele	12 mm
Montážní otvory	2 x závit M, rozteč 25 mm
Hmotnost	160 g
Rozměry	36 x 58 mm

## 5.2 VÝPOČET PŘEVODOVKY

Pro dosažení požadovaného převodového poměru a také z důvodu překonání výškového rozdílu vstupu a výstupu, byla zvolena konstrukce převodovky, která se skládá ze tří stupňů – z planetového převodu a dvou čelních ozubených převodů. K výpočtu parametrů ozubených kol bylo využito následujících vzorců (1-9) [14].

Průměr roztečné kružnice  $d$  [mm] je definován jako součin modulu ozubení  $m$  [mm] a počet zubů  $z$  [-]. Pomocí modulu ozubení se spočítá výška hlavy zubu  $h_a$  [mm], výška paty zubu  $h_f$  [mm] a výška zubu  $h$  [mm]. Pomocí roztečné kružnice a velikosti výšek zubu se dopočítají zbylé průměry kružnic ozubení, a to hlavová kružnice  $d_a$  [mm] a patní kružnice  $d_f$  [mm]. Průměr základní kružnice  $d_b$  [mm] se dopočítá podle průměru roztečné kružnice a úhlu profilu ozubení  $\alpha$  [°]. Hlavová vůle  $c$  [mm] se spočítá pomocí výšky hlavy a paty zubu. Rozteč zubů  $p$  [mm] se dopočítá pomocí modulu ozubení.

$$d = m * z \quad (1)$$

$$d_a = d + 2 * h_a \quad (2)$$

$$d_f = d - 2 * h_f \quad (3)$$

$$d_b = d * \cos\alpha \quad (4)$$

$$h_a = m \quad (5)$$

$$h_f = 1,25 * m \quad (6)$$

$$h = h_a + h_f \quad (7)$$

$$c = h_f - h_a \quad (8)$$

$$p = \pi * m \quad (9)$$

### 5.2.1 VÝPOČET PLANETOVÉHO PŘEVODU

Planetový převod je složen ze dvou jednoduchých planetových převodů. Tab. 2 vidíme jednotlivé parametry planetového převodu vypočítané ze vztahů (1–9).

Tab. 2 Parametry planetového převodu

	Centrální kolo	Satelit	Korunové kolo
Modul: $m$ [mm]	0,8		
Počet zubů: $z$ [-]	21	24	69
Průměr roztečné kružnice: $d$ [mm]	16,8	19,2	55,2
Průměr hlavové kružnice: $d_a$ [mm]	18,4	20,8	53,6
Průměr patní kružnice: $d_f$ [mm]	14,8	17,2	57,2
Základní kružnice: $d_b$ [mm]	15,78	18,04	51,87
Výška hlavy zubu: $h_a$ [mm]	0,8		
Výška paty zubu: $h_f$ [mm]	1		
Výška zubu: $h$ [mm]	1,8		
Hlavová vůle: $c$ [-]	0,2		
Úhel profilu ozubení: $\alpha$ [°]	20		
Rozteč: $p$ [-]	2,513274123		
Počet satelitů: $q$ [-]	3		

Aby byl planetový převod funkční, je potřeba dodržet tři podmínky. Podmínku smontovatelnosti, podmínku stejných osových vzdáleností a podmínku vůle mezi sousedními satelity (podmínku sousedství).

#### PODMÍNKA SMONTOVATELNOSTI

Tato podmínka určuje, jestli bude možné smontování převodu. Musí být splněna u planetového převodu s větším počtem satelitů. Podmínka říká, že součet zubů centrálního  $z_c$  [-] a korunového kola  $z_k$  [-] musí být dělitelný počtem satelitů  $s$  [-] [11].

$$x = \frac{z_c + z_k}{s} \quad (10)$$

Při dosazení do vztahu (9) musí vyjít celé číslo, aby tato podmínka byla splněna.

$$x = \frac{21 + 69}{3} = 30$$

#### PODMÍNKA STEJNÝCH OSOVÝCH VZDÁLENOSTÍ

Tato podmínka říká, že poloměr korunového kola  $d_k$  [mm] musí být roven součtu poloměru centrálního kola  $d_c$  [mm] a průměru satelitu  $d_s$  [mm] [11].

$$\frac{d_k}{2} = \frac{d_c}{2} + d_s \quad (11)$$



Z této podmínky můžeme po dosazení počtu zubů centrálního kola  $z_c$  [-] a korunového kola  $z_k$  [-] určit počet zubů satelitu  $z_s$  [-]:

$$z_s = \frac{z_k - z_c}{2} \quad (12)$$

$$z_s = \frac{69 - 21}{2} = 24$$

#### PODMÍNKA VŮLE MEZI SOUSEDNÍMI SATELITY

Aby nedošlo ke kontaktu hlav zubů satelitu, je potřeba určit maximální počet satelitů. Minimální vůle mezi satelity  $v_{min}$  [mm] musí být větší než dva milimetry. Při výpočtu se nejdřív vypočte nejmenší úhel mezi satelity  $\vartheta_{min}$  [°], který je definován geometrickou funkcí  $arcsi$ , průměrem hlavové kružnice satelitu  $d_{as}$  [mm], průměrem roztečné kružnice centrálního kola  $d_c$  [mm] a minimální vůli mezi satelity  $v_{min}$  [mm]. Následně se vypočte maximální počet satelitů  $q$  [-]. Po vypočtení počtu satelitů je nutné číslo zaokrouhlit na nejbližší nižší celé číslo [15].

$$\vartheta_{min} = arcsin * \frac{d_{as} + v_{min}}{d_c + d_{as}} \quad (13)$$

$$\vartheta_{min} = arcsin * \frac{20,8 + 2}{16,8 + 20,8} = 37,328$$

Po dosazení do vztahu (14) získáme maximální počet satelitů:

$$q = \frac{360}{\vartheta_{min}} \quad (14)$$

$$q = \frac{360}{37,328} = 9,644$$

#### PŘEVODOVÝ POMĚR PLANETOVÉHO PŘEVODU

Při výpočtu převodového poměru planetového převodu se zastaveným korunovým kolem  $i_{cu}^k$  [-] se využívá počtu zubu centrálního kola  $z_c$  [-] a korunového kola  $z_k$  [-]. Užitím vztahu (15) vypočítáme převodový poměr planetového převodu [12].

$$i_{cu}^k = \frac{z_k}{z_c} + 1 \quad (15)$$

$$i_{cu}^k = \frac{69}{21} + 1 = 4,2857$$

### 5.2.2 PARAMETRY DRUHÉHO A TŘETÍHO STUPNĚ PŘEVODOVKY

V Tab. 3 a Tab. 4 vidíme parametry druhého a třetího stupně převodovky. Parametry jsou spočítány podle vztahů (1–9).

Tab. 3 Parametry druhého převodového stupně

	Pastorek	Kolo
Modul: $m$ [mm]	0,94	
Počet zubů: $z$ [-]	19	21
Průměr roztečné kružnice: $d$ [mm]	17,86	19,74
Průměr hlavové kružnice: $d_a$ [mm]	19,74	21,62
Průměr patní kružnice: $d_f$ [mm]	15,51	17,39
Základní kružnice: $d_b$ [mm]	16,78	18,55
Výška hlavy zubu: $h_a$ [mm]	0,94	
Výška paty zubu: $h_f$ [mm]	1,175	
Výška zubu: $h$ [mm]	2,115	
Hlavová vůle: $c$ [-]	0,235	
Úhel profilu ozubení: $\alpha$ [°]	20	
Rozteč: $p$ [-]	2,953097094	
Převodový poměr: $i$ [-]	1,105263158	

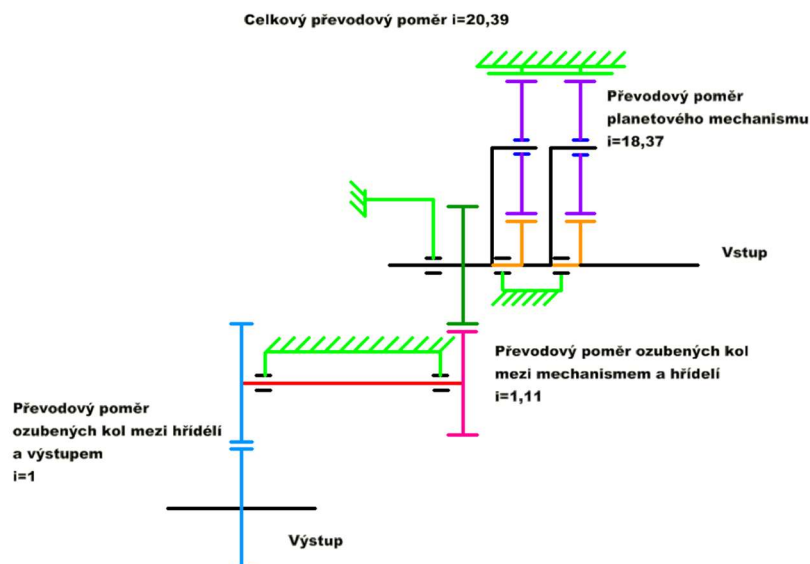
Tab. 4 Parametry třetího stupně převodovky

	Pastorek	Kolo
Modul: $m$ [mm]	1	
Počet zubů: $z$ [-]	25	
Průměr roztečné kružnice: $d$ [mm]	25	
Průměr hlavové kružnice: $d_a$ [mm]	27	
Průměr patní kružnice: $d_f$ [mm]	22,5	
Základní kružnice: $d_b$ [mm]	23,49	
Výška hlavy zubu: $h_a$ [mm]	1	
Výška paty zubu: $h_f$ [mm]	1,25	
Výška zubu: $h$ [mm]	2,25	
Hlavová vůle: $c$ [-]	0,25	
Úhel profilu ozubení: $\alpha$ [°]	20	
Rozteč: $p$ [-]	3,141592654	
Převodový poměr: $i$ [-]	1	

### 5.3 KINEMATIKA PŘEVODOVKY

Planetový převod použitý v převodovce je složen ze dvou jednoduchých planetových převodů. Korunové kolo je pevně uchyceno ke skříni převodovky, aby se dosáhlo velké redukce, a tudíž požadovaného převodového poměru. Hřídel motoru je přímo napojena na centrální kolo prvního jednoduchého planetového převodu. Z centrálního kola se krouticí moment převádí na satelity. Satelity jsou uchyceny na unašeči, který je pevně spojen s centrálním kolem druhého jednoduchého planetového převodu. Druhý unašeč je pevně spojen s pastorkem druhého

stupně. Čelním převodem ozubenými koly je moment převáděn na hřídel. Z hřídele je opět převáděn moment čelním převodem ozubenými koly na hřídel výstupní. Na Obr. 23 je zobrazeno kinematické schéma převodovky, jak je postupně převáděn krouticí moment z motoru na výstupní hřídel.



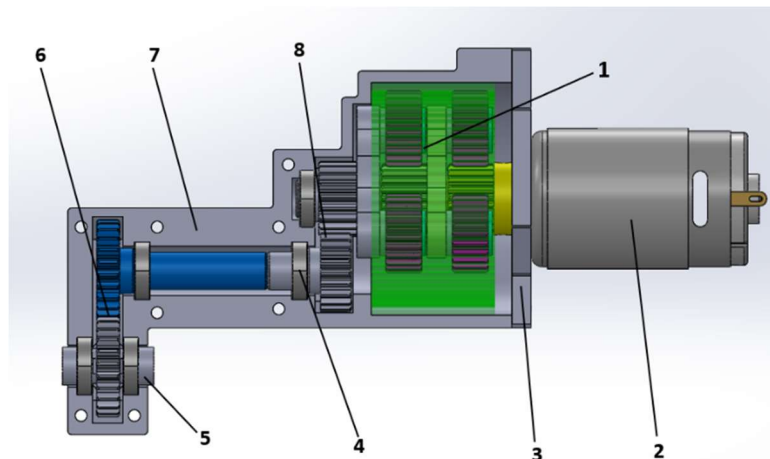
Obr. 23 Kinematické schéma převodovky

## 5.4 MODEL PŘEVODOVKY

Model převodovky byl vytvářen v programu Solidworks 2019 pomocí kružnic ozubení a křivek popsaných parametrickými rovnicemi, aby se dosáhlo přesného evolventního profilu jednotlivých zubů.

Při prvotním modelování se využívalo programu Inventor 2019. V tomto programu se dá generovat ozubení jednoduše za pomoci vstupních parametrů, jako je modul ozubení a převodový poměr. Od tohoto generování se následně odstoupilo, jelikož nevznikal model s přesně vymodelovanými profily zubů ozubení, ale pouze se zjednodušeným profilem zubů. Takového zjednodušeného profilu však nelze využít, jelikož by následný vytištěný model nebylo možné smontovat. Prvotně byl také návrh koncipován, aby požadovaný převodový poměr převáděl pouze planetový převod, od toho se však také odstoupilo z důvodu velikosti takového převodu.

Při modelování převodovky se myslelo na co největší využití výhod 3D tisku. Proto jsou některé díly navrženy jako jedna součást, např. centrální kolo s unašečem, aby se následně nemusely spojovat šroubem a maticí. Kvůli přesnosti technologie 3D tisku byla při návrhu převodky všude uvažována vůle, aby následně do sebe součásti zapadaly a bylo je možné smontovat. Model převodovky je vyobrazen na Obr. 24.

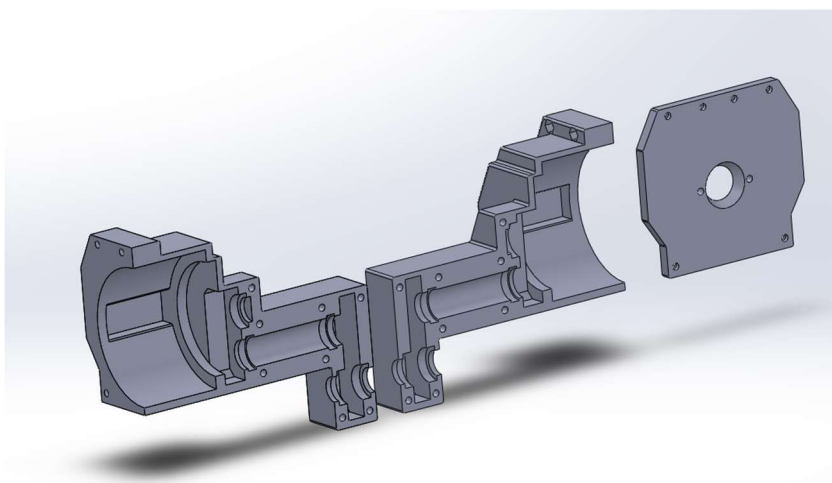


Obr. 24 Model převodovky

1. Planetový převod, 2. Motor, 3. Čelní příruba, 4. Ložisko, 5. Výstupní hřídel, 6. Třetí stupeň, 7. Skříň převodovky, 8. Druhý stupeň

#### 5.4.1 SKŘÍŇ PŘEVODOVKY

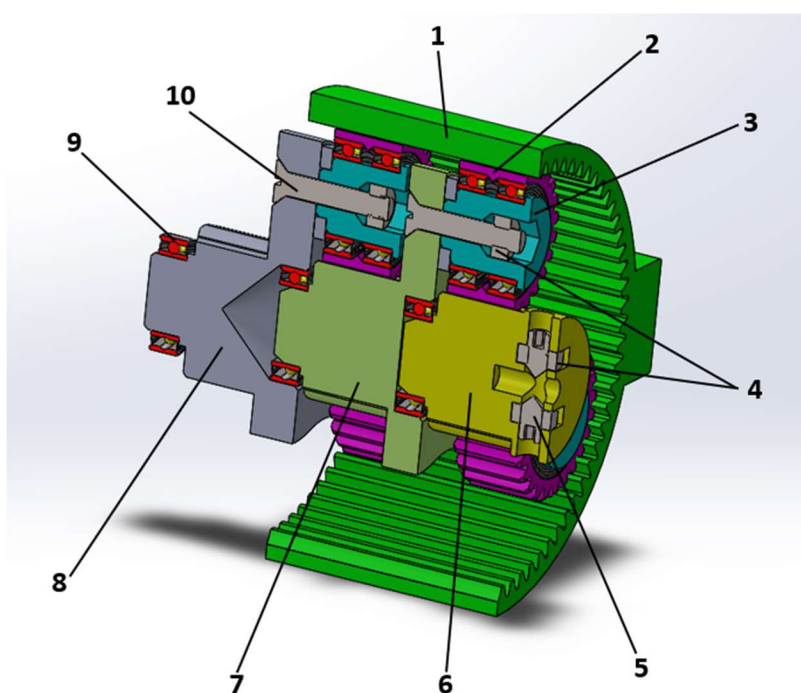
Skříň se skládá ze tří částí. Hlavní část skříně je rozdělena rovinou procházející středem převodovky. Samostatnou část pak tvoří čelní příruba. Celá skříň je spojena pomocí šroubů s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem M3 podle normy ČSN 02 1143 a šestihrannou maticí M3 podle normy ČSN EN ISO 4032, které mají ve skříní vytvořeny negativ, z důvodu snadné montáže převodovky. Otvory pro šrouby byly navrženy poblíž ložisek, jelikož ložiska zachytávají radiální síly. Vnější rozměry převodové skříně plně respektují zadaný zástavbový prostor. Dále bylo nutné při návrhu zohlednit velikosti navrhnutého planetového mechanismu tak, aby bylo možné korunové kolo pevně uchytnout do prostoru skříně. Byly zde také dodrženy rozměry, kde vstupuje hřídel motoru do převodovky, a kde vystupuje hřídel z převodovky. Model skříně převodovky je vidět na Obr. 25. Ke skříní je pevně připojeno pouze korunové kolo, ostatní součásti jsou vloženy do ložisek a následně uchyceny ve skříní.



Obr. 25 Model skříně převodovky

### 5.4.2 MODEL PLANETOVÉHO MECHANISMU

Korunové kolo má na vnějším obvodu dva výstupky, které zapadají do skříně převodovky, aby bylo korunové kolo nehybné. Každý satelit je uložen na dvou ložiscích, které jsou nasazeny na čep. Čep je k unašeci připevněn šroubem se zápusťnou hlavou M3 podle normy ČSN 02 1151 a šestihrannou maticí M3 podle normy ČSN EN ISO 4032. Mezi čep a unašec je dále vložena podložka 6 podle normy ČSN 02 1702. První, vstupní centrální kolo je pevně spojeno s hřídelí motoru pomocí stavěcích šroubů M3 podle normy ČSN 02 1191 a matic M3 podle normy ČSN EN ISO 4032. Kolo je dále uloženo do ložiska, které je vloženo do prvního unašeče, čímž se zajistila souosost mechanismu. Stejným způsobem je napojeno i druhé centrální kolo do druhého unašeče. Druhé centrální kolo je navrženo spolu s prvním unašečem jako jedna součást. Druhý unašec je pevně spojen s pastorkem čelního ozubeného převodu druhého stupně. Řez modelu planetového mechanismu vidíme na Obr. 26.

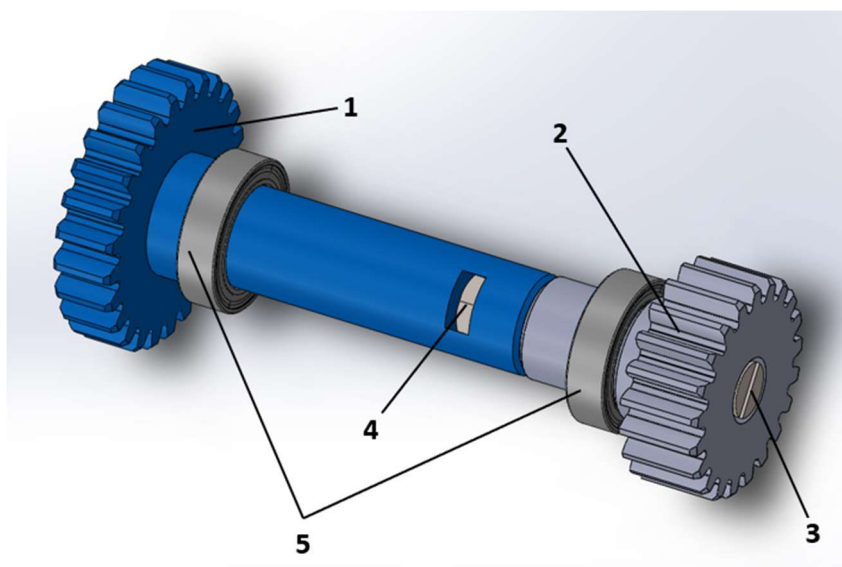


*Obr. 26 Model planetového mechanismu*

*1. Korunové kolo, 2. Satelit, 3. Čep satelitu, 4. Matice M3, 5. Stavěcí šroub M3, 6. První centrální kolo, 7. Druhé centrální kolo s unašcem, 8. Pastorek druhého stupně s unašcem, 9. Ložisko, 10. Šroub se zápusťnou hlavou M3*

### 5.4.3 HŘÍDEL MEZI DRUHÝM A TŘETÍM STUPNĚM

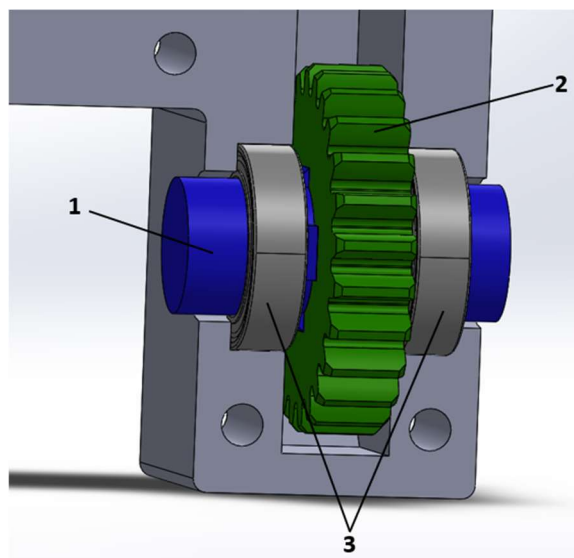
Hřídel je rozdělena na dva díly, aby ji bylo možné rozmontovat k výměně ložisek. Součástí každého dílu hřídele je ozubené kolo. Hřídel je spojena tvarovým stykem a pevně uchycena šroubem se zápusťnou hlavou M3 podle normy ČSN 02 1151 a šestihrannou maticí M3 podle normy ČSN EN ISO 4032, která má v hřídeli otvor, do kterého je vložena. Hřídel je uložena na ložiscích a ty následně uloženy ve skříní převodovky. Konstrukční řešení spojovací hřídele s ozubenými koly vidíme na Obr. 27.



Obr. 27 Hřídel mezi druhým a třetím stupněm  
1. Pastorek třetího stupně, 2. Kolo druhého stupně, 3. Šroub se zápustnou hlavou, 4. Matice, 5 Ložiska

#### 5.4.4 MODEL VÝSTUPNÍ HŘÍDELE

Výstupní hřídel má na svém vnějším obvodu čtyři výstupky, pomocí kterých se spojí s kolem třetího stupně převodovky. Kolo je s hřídelí pevně spojeno lepidlem. Hřídel je uložena v ložiscích a ta následně uložena ve skříni převodovky. Jak vypadá hřídel a jak je uložena vidíme na Obr. 28.



Obr. 28 Model výstupní hřídele  
1. Výstupní hřídel, 2. Kolo druhého stupně, 3. Ložiska

## 6 TISK A MONTÁŽ PŘEVODOVKY

Pro účely 3D tisku bylo nezbytné převést veškeré modely do formátu souboru STL a následně tyto soubory nahrát do programu Slicer, který rozdělí materiál na jednotlivé vrstvy. Dále se v programu nastaví parametry tisku. Vzhledem k tomu, že se jedná o nový návrh, bylo nutné provést zkušební tisk a ověřit si správnost předpokládaných tolerancí. Pokud by docházelo ke vzniku komplikací, ať už během tiku nebo při sestavování předovky, znamenalo by to potřebu ji dále optimalizovat, ať už z pohledu geometrie nebo tiskového nastavení.

### 6.1 MATERIÁL PRO TISK PŘEVODOVKY

Zvoleným materiálem pro tisk převodovky je materiál PLA. Materiál je zvolen hlavně na základě zkušeností komunity vlastníků RC modelu vozidla. Samotný materiál je vhodný také díky svým mechanickým vlastnostem a nízké ceně filamentu. Materiál PLA má dostačující mechanické vlastnosti a malou teplotní roztažnost. Jeho největší nevýhodou je tepelná odolnost, proto pokud by od motoru vznikalo příliš vysoké teplo, které by materiál PLA nemusel vydržet, čelní příruba a centrální kolo by se tiskly z tepelně odolnějšího materiálu jako je ASA. Samotná převodovka je tisknuta z filamentu od firmy PLASTY MLADÉČ a průměr struny je 1,75 mm. Doporučené nastavení teplot výrobcem a vlastnosti materiálu můžeme vidět v Tab. 5.

Tab. 5 Vlastnosti materiálu PLA [16][20]

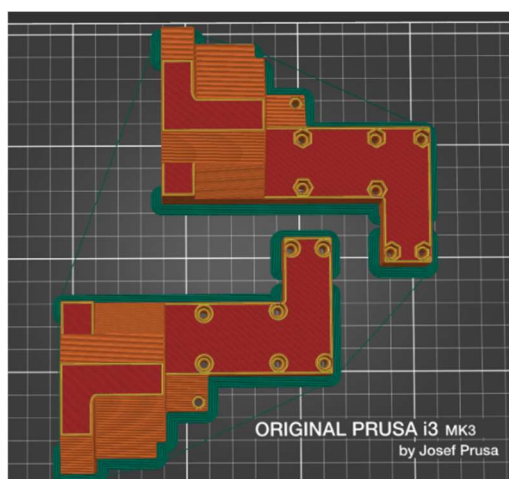
Vlastnost	Parametr
Teplota trysky	200 - 220 °C
Teplota podložky	60 °C
Komora při tisku	Nepovinná
Přilnutí první vrstvy	Dobré
Výpary	Skoro žádné
Modul pružnosti [GPa]	4
Pevnost v ohybu [MPa]	80
Pevnost v tahu [Mpa]	110

### 6.2 NASTAVENÍ TISKU V PROGRAMU PRUSA SLICER

Všechny komponenty byly rozmístěny na tři tiskové podložky. Na první je skříň převodovky, na druhé čelní příruba a centrální kola a na třetí zbylé komponenty. Tento postup byl volen na základě nedostatečného místa na podložce pro umístění všech komponent, a také proto, aby se nemusel celý tisk opakovat znovu, kdyby během tisku došlo k chybě. Celkový čas tisku je odhadován na 28 hod a 3 min, z toho 13 hod a 22 min zabere tisk skříně převodovky, 2 hod a 14 min tisk čelní příruby a centrálního kola a 12 hod a 27 min zabere tisk zbylých součástí.

Rozložení skříně převodovky na první tiskové podložce je vidět na Obr. 29. U běžného tisku je dostačující 20 % hustota výplně. Pro tisk skříně byla volena hustota výplně 25 % a tři perimetry s ohledem na dostatečnou pevnost a rychlost tisku. Ke zvýšení přilnavosti skříně k podložce se využilo límce. Všechny nastavené parametry pro tisk skříně můžeme vidět v Tab. 6.



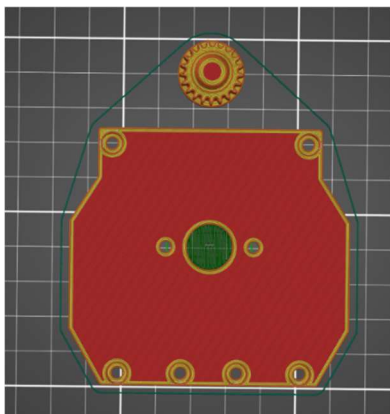


Obr. 29 Rozložení skříně převodovky na první podložce

Tab. 6 Nastavni tisku skříně převodovky

Nastavení	Hodnota
Výška vrstvy [mm]	0,2
Počet perimetrů	3
Plných vrstev vrchních	5
Plných vrstev spodních	4
Hustota výplně [%]	25
Vzor výplně	Gyroid

Na Obr. 30 můžeme vidět rozložení na druhé tiskové podložce, na které se nachází čelní příruba a centrální kolo. Tyto součásti jsou dány na zvláštní podložku, kdyby u těchto součástí bylo nutné změnit materiál tisku. Tyto součásti jsou spojené s motorem, který by mohl vydávat vyšší teplo, které by nemusel materiál PLA vydržet. Pokud by se prokázalo, že nevydrží, šlo by využít materiálu ASA, který má vyšší tepelnou odolnost. V Tab. 7 vidíme, jak jsou nastaveny hodnoty pro tisk čelní příruby a centrální kola.



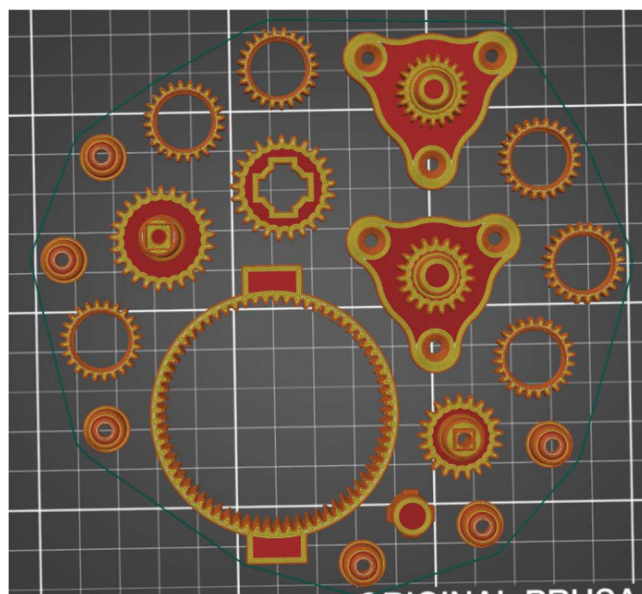
Obr. 30 Rozložení čelní příruby a centrálního kola na druhé tiskové podložce



Tab. 7 Nastavení tisku pro čelní přírubu a centrální kolo

Nastavení	Čelní příruba	Centrální kolo
Výška vrstvy [mm]	0,2	0,2
Počet perimetrů	3	4
Plných vrstev vrchních	5	5
Plných vrstev spodních	4	4
Hustota výplně [%]	25	40
Vzor výplně	Gyroid	Gyroid

Na třetí tiskové podložce se nachází zbylé součásti převodovky (Obr. 31). Jelikož jde hlavně o ozubená kola, je zde vyšší hodnota perimetrů a množství výplně. Nastavené hodnoty tisku vidíme v Tab. 8. Pro čepy satelitu byly nastaveny pouze dva perimetry a množství výplně na 25 %, a to s ohledem na nižší zatížení než u zbylých součástí. U pastorku třetího stupně byly pro tisk nastaveny podpory jako u jediné součásti, a to z důvodu tisku otvoru pro matici.



Obr. 31 Rozložení zbylých součástí na třetí tiskové podložce

Tab. 8 Nastavení tisku zbylých součástí

Nastavení	Hodnota
Výška vrstvy [mm]	0,2
Počet perimetrů	4
Plných vrstev vrchních	5
Plných vrstev spodních	4
Hustota výplně [%]	40
Vzor výplně	Gyroid

### 6.3 TISKÁRNA PRUSA i3 MK3S

Samotný tisk modelu bude proveden na tiskárně Prusa i3 MK3S, kterou vlastní ÚADI. Tato tiskárna je jednou z nejrozšířenějších v oblasti hobby tisku. Parametry použité tiskárny můžeme vidět v Tab. 9.

Tab. 9 Vlastnosti tiskárny Prusa i3 MK3S [18]

Vlastnost	Parametr
Pracovní prostor	250 x 210 x 210 mm
Rychlost tisku	až 200 mm · s <sup>-1</sup>
Tryska	0,4 mm vyměnitelná
Výška vrstvy	od 0,05 mm
Vyhřívaná podložka	ANO
Automatická kalibrace	ANO
Příkon	200 W max.

### 6.4 PRŮBĚH TISKU

Před tiskem bylo potřeba zkontrolovat tiskárnu, zavést správný filament a připravit tiskovou podložku spolu s tiskovými ocelovými pláty, na které se poté mělo tisknout. Ocelové pláty měly hladký PEI povrch, jenž je ideální pro tisk z materiálu PLA. Na začátku tisku je vždy nezbytné pohlídat první vrstvu kvůli dostatečné přilnavosti výtisku k podložce. V případě, že vrstva k podložce dostatečně nepřilne, je možno upravit výšku trysky a nebo lépe připravit tiskový plát. Samotný průběh tisku nevyžaduje zvláštní pozornost. Po dokončení tisku se provádí závěrečné sundání vytištěných dílů, a to vždy po úplném vychladnutí tiskové podložky.

Vytisknutí všech součástí nejprve předcházelo tisk zjednodušeného modelu planetového mechanismu s výškou pět milimetrů. Tento zkušební tisk měl prokázat přesnost tisku a také ověřit, jestli jsou vůle mezi zuby dostatečné a jestli půjde mechanismus složit. Po vytisknutí šlo složit mechanismus do sebe s lehkým odporem, a proto byly zuby satelitu zmenšeny o jednu desetinu milimetru. Ostatní rozměry výtisku odpovídaly 3D modelu, proto byly ostatní součásti převodovky ponechány beze změn a postupně byly všechny vytištěny. Na Obr. 32 vidíme vytisknutý zkušební planetový mechanismus[19].



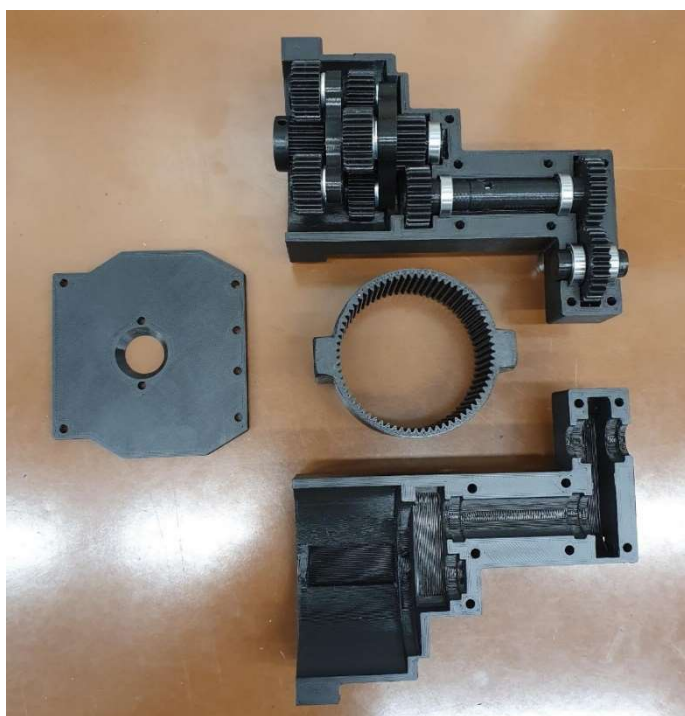
*Obr. 32 Zkušební tisk planetového mechanismu*

## 6.5 SESTAVENÍ PŘEVODOVKY

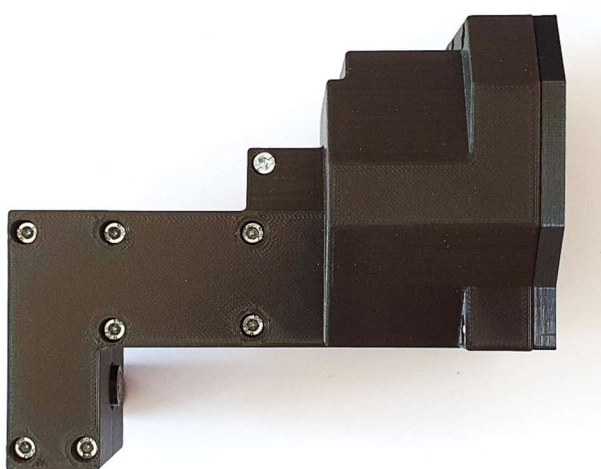
Sestavení se rozdělilo do dvou kroků. Prvně se sestavily jednotlivé dílčí součásti převodovky na větší celky, jako jsou výstupní hřídel s kolem třetího stupně, hřídel mezi druhým a třetím stupněm, satelity s čepy a ložisky, které se následně spojily s jednotlivými unašeči. Poté byly jednotlivé celky uloženy do skříně převodovky.

U dílčích součástí se nejprve nasadilo kolo třetího stupně na výstupní hřídel, která byla následně osazena ložisky. Poté byly z hřídele mezi druhým a třetím stupněm odstraněny podpěry z otvoru pro matici. Na jednotlivé části hřídele byla nasezena ložiska a hřídel byla spojena šroubem a maticí. Následně se smontovaly satelity s čepy a ložisky. Do každého satelitu byla vložena dvě ložiska, každé z jedné strany. Do ložisek byl vložen čep a na jeho konec bez osazení byla nasazena vymezovací podložka. Čepy se satelity se následně připevnilly jednotlivě na unašeč planetového převodu šroubem a maticí. Druhý unašeč byl osazen dvěma ložisky. První ložisko bylo nasazeno ze strany pastorku a druhé vloženo přímo do unašeče. Do prvního unašeče bylo obdobným způsobem ze strany motoru taktéž vloženo ložisko. Do tohoto ložiska následně přijde vložit první centrální kola (pastorek motorku).

Následně se jednotlivé celky vložily do jedné poloviny skříně převodovky. Prvně byla do skříně vložena výstupní hřídel. Následně byla vložena hřídel s kolem druhého stupně a pastorkem třetího stupně. Dále bylo do skříně vsazeno korunové kolo a do něj vsunuty postupně oba unašeče. Poté se nasadila druhá polovina skříně a spojila se s první polovinou šrouby a maticemi. Následně se do planetového převodu vložilo první centrální kolo (pastorek motorku) a pak se přiložila čelní příruba, která se spojila se skříní převodovky opět pomocí šroubů a matic. Na Obr. 33 můžeme vidět jak vypadají jednotlivé celky názorně uloženy ve skříně (pro názornost bez korunového kola) a na Obr. 34 vidíme již sestavenou celou převodovku.



*Obr. 33 Uložení jednotlivých celků ve skříni*



*Obr. 34 Sestavena převodovka*

Při kompletaci převodovky byly nalezeny tři nedostatky. První byl zjištěn u výstupků na korunovém kole. Korunové kolo šlo vložit do skříně pouze s větším odporem, a proto se model korunového kola modifikoval tak, aby byla zajištěna bezproblémová montáž a demontáž. Druhý nedostatek byl zjištěn u otvoru pro první centrální kolo v čelní přírubě. Otvor bylo nutné zvětšit, aby zde nedocházelo ke kolizi a možnému tření. Třetí z problémů vznikl u otvoru v prvním unašeči pro ložisko. Při tisku tohoto otvoru se využila funkce přemostování, což vedlo k lehkému prověšení plastových vláken o které se následně třel vnitřní kroužek ložiska. Tento problém byl vyřešen prohloubením otvoru pro ložisko a zkosením hran tak, aby ložisko nedosadlo celou boční plochou k unašeči.

## ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla zaměřena na konstrukční návrh planetové převodovky RC modelu automobilu vyráběné metodou 3D tisku.

V první části práce byla provedena rešerše v oblasti aktuálních technologií 3D tisku a následně byla vybrána vhodná technologie pro hobby uživatele. Aktuálně se využívá tři technologií 3D tisku, a to technologie FDM, SLA a SLS. Vhodnou technologií pro hobby uživatele je technologie FDM, jelikož tiskárny a materiály pro tuto technologii patří k nejlevnějším. Nejlevnější FDM 3D tiskárny se dají pořídit už od 2 500 Kč z Číny. Kvalitní FDM tiskárny pro hobby tisk se pak pohybují okolo 20 000 Kč, např. tiskárna Prusa i3 MK3S+. Touto technologií tisku je velmi hojně využívaný materiál PLA. Tisková struna materiálu PLA se nyní na trhu prodává za cenu od 300 Kč za 0,5 kg. Technologie FDM je také vhodná z důvodu kvalitních výtisků a jednoduššího nastavení tisku oproti ostatním technologiím.

Druhá část práce byla zaměřena na návrh planetové převodovky pro RC model vozidla od firmy 3Dsets, kterou bude možné vyrobit pomocí metod hobby 3D tisku. Dosavadní převodovka trpí rychlým opotřebením některých ozubených kol, proto vznikla myšlenka vytvořit převodovku s planetovým mechanismem. Samotný návrh byl limitován zástavbovým prostorem v již navrženém RC modelu, převodovým poměrem 20:1 a také polohou hřídelí, ve kterých vstupuje a vystupuje krouticí moment do a z převodovky. Další požadavek se týkal použití jednotných ložisek velikosti 6700ZZ. Navržená převodovka všechny tyto požadavky splňuje.

Převodovka byla navržena tří stupňová s neměnným převodovým poměrem. Aby převodovka dosáhla požadovaného převodového poměru, byl navrhnut planetový mechanismus složený ze dvou jednoduchých planetových mechanismů dosahujících velké redukce. Planetový mechanismus obsahuje vždy tři satelity, a to s ohledem na úsporu materiálů. Celkový převodový poměr planetového mechanismu je 18,37. Druhý a třetí převodový stupeň je tvořen z čelního převodu ozubenými koly. Převodový poměr druhého stupně je 1,11. U třetího stupně je počet zubů pastorku i kola shodný. Převodový poměr třetího stupně je tedy 1. Třetím stupněm dochází pouze k dosažení požadované polohy výstupní hřídele převodovky. Celkový převodový poměr navržené převodovky je 20,39.

K modelování převodovky byl využit CAD program Solidworks 2019. Tento program se ukázal jako vhodný k modelování přesných profilů ozubení. Získat v modelu přesný profil ozubení bylo zcela zásadní pro úspěšné použití vytištěných převodů. Při modelování částí, které do sebe vzájemně zapadají, se musela uvažovat vhodná vůle. Vůle byla s ohledem na přesnost 3D tisku volena 0,1 až 0,2 mm. Konstrukce převodovky byla navržena tak, aby došlo k maximálnímu využití výhod 3D tisku.

Před tiskem všech součástí převodovky byl vytištěn zjednodušený model planetového převodu z důvodu ověření reálných rozměrů výtisku a navržení vhodné boční vůle mezi zuby. Převod bylo možné smontovat s lehkým odporem, a proto byly zuby satelitu zúženy o 0,1 mm. Po vytisknutí a smontování převodovky byly zjištěny celkově tři nedostatky, které byly úpravou modelu odstraněny.

Převodovka je tištěna z materiálů PLA na tiskárně Prusa i3 MK3S. Jednotlivé díly byly rozloženy celkově na tři tiskové plochy. Na první byly rozloženy dvě poloviny skříně, na druhé bylo umístěno první centrální kolo a čelní příruba a na třetí zbytek součástí. Celkový čas tisku byl 28 hodin a 3 minuty, z toho zabral tisk skříně 13 hodin a 22 minut, tisk centrálního kola

spolu s čelní přírubou 2 hodiny a 14 minut a tisk zbytku součástí 12 hodin a 27 minut. Pro tisk bylo využito 73,83 metrů filamentu, objem spotřebovaného filamentu byl 177,6 cm<sup>3</sup> a hmotnost spotřebovaného filamentu byla 220 g.

Celý RC model vozidla nebyl v době odevzdávání práce k dispozici, proto nebylo možné přímo ověřit funkci převodovky v autě. Především se jedná o ověření, zda kvůli zvýšených pracovních teplot motorku nebude nutné vytištění prvního centrálního kola a čelní příruby z jiného materiálu. Tyto dva díly jsou v přímém kontaktu s motorkem automobilu, od kterého by mohlo vznikat až příliš vysoké teplo, které by materiál PLA nemusel vydržet. Jako náhradu bych navrhnul materiál ASA, který má podobné nebo lepší mechanické vlastnosti a zároveň má mnohem lepší tepelnou odolnost než PLA. V případě, že by stále docházelo k opotřebení ozubených kol, pak by zde byla možnost využít navrženou převodovku, ale provést záměnu přímého ozubení za ozubení šípové. Toto ozubení má vyšší odolnost proti opotřebení a tišší chod.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] STŘÍTENSKÝ, Ondřej, Josef PRŮŠA a Martin BACH. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. Praha: Prusa Research, [2019].
- [2] HORNE, Richard a Kalani Kirk HAUSMAN. *3D printing for dummies*. 2nd edition. Hoboken, NJ: John Wiley, [2017]. {-- }For dummies. ISBN 978-1-119-38631-5.
- [3] NOORANI, Rafiq. *3D printing: technology, applications, and selection*. Boca Raton: CRC Press, [2018]. ISBN 978-1-4987-8375-0.
- [4] GIBSON, Ian, David W. ROSEN a Brent STRUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York Heidelberg Dordrecht London: Springer, [2010]. ISBN 978-1-4419-1119-3.
- [5] KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno: Computer Press, 2017. ISBN ISBN978-80-251-4876-1.
- [6] *3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna?* [online]. 21.2. 2019 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457-2>
- [7] PRŮVODCE MATERIÁLY. *PRUSA RESEARCH by JOSEF PRUSA* [online]. [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [8] MORAVEC, Vladimír. *Mechanické a hydraulické převody*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN ISBN978-80-248-1057-7.
- [9] KRÍŽ, Rudolf. *Stavba a provoz strojů II převody*. Česká Republika: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1978.
- [10] VLK, František. *Převodová ústrojí motorových vozidel*. 2. vyd. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-239-0025-0.
- [11] PEŠÍK, Lubomír. *Části strojů: stručný přehled*. Vyd. 4., dopl. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010. ISBN ISBN978-80-7372-574-7.
- [12] KAPLAN, Zdeněk. Převodovky planetové [přednáška]. Brno: VUT FSI 24. 11. 2020
- [13] KAPLAN, Zdeněk. Diferenciály [přednáška]. Brno: VUT FSI 8. 12. 2020
- [14] SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. BRNO: VUTUM, c2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [15] KRÍŽ, Rudolf. *Strojnické tabulky II - pohony: hřídele, ozubené převody, řetězové a řemenové převody*. Ostrava: Montanex, 1997. ISBN 80-857-8051-8.
- [16] ROZDÍL MEZI ABS,PLA, PETG. *MATERIALPRO 3D* [online]. BRNO, 2017 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>

- [17] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.
- [18] 3D TISKÁRNY PRUSA RESEARCH. *3D STATION* [online]. BRNO: 3D Print Station [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.3dstation.cz/prusa/>
- [19] *PŘÍRUČKA 3D TISKAŘE*. Česká Republika: Prusa Research, 2020.
- [20] *Filament PM* [online]. Haňovice [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/>



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$c$	[mm]	Hlavová vůle ozubení
$d$	[mm]	Průměr roztečné kružnice ozubení
$d_a$	[mm]	Průměr hlavové kružnice ozubení
$d_b$	[mm]	Průměr základní kružnice ozubení
$d_c$	[mm]	Průměr roztečné kružnice centrálního kola
$d_f$	[mm]	Průměr patní kružnice ozubení
$d_h$	[mm]	Průměr hlavové kružnice satelitu
$d_k$	[mm]	Průměr roztečné kružnice korunového kola
$d_s$	[mm]	Průměr roztečné kružnice satelitu
$h$	[mm]	Výška zubu
$h_a$	[mm]	Výška hlavy zubu
$h_f$	[mm]	Výška paty zubu
$i_{cu}^k$	[-]	Převodový poměr planetové převodu při zastaveném korunovém kole
$m$	[mm]	Modul ozubení
$p$	[mm]	Rozteč zubu ozubení
$q$	[-]	Počet satelitů
$s$	[-]	Počet satelitů
$v_{min}$	[mm]	Minimální vůle mezi satelity
$x$	[-]	Neznámá v podmínce smontovatelnosti
$z$	[-]	Počet zubů ozubení
$z_c$	[-]	Počet zubů centrálního kola
$z_k$	[-]	Počet zubů korunového kola
$z_s$	[-]	Počet zubů satelitu
$\alpha$	[°]	Úhel profilu ozubení
$\vartheta_{min}$	[°]	Nejmenší úhel mezi satelity

## SEZNAM PŘÍLOH

P1	Výkres sestavení	BP-A2-00
P3	Seznam položek	BP-A4-K-00 LIST 1
P4	Seznam položek	BP-A4-K-00 LIST 2
P5	Výkres čelní příruby	BP-A3-02
P6	Výkres unašeč 2	BP-A3-07
P7	Výkres kola druhý stupeň	BP-A3-09